

論文

합성거동을 위한 유공판형 전단연결재의 강도평가에 관한 연구

김영호*

A Study on the Evaluation of Shear Resisting Capacity for the Various Perforated Shape Shear Connector

Young-Ho, Kim*

ABSTRACT

In recent years, the reversed L-shaped perforated shear connector has been developed to mitigate the problem associated with headed stud and Perfobond shear connector and to simulate the simultaneous failure of concrete and shear connector. And FRP perforated shear connector has been applied to composite concrete and FRP module in the FRP-concrete composite bridge deck. The design criterion of the reversed L-shaped and FRP perforated shear connector has not been established yet since the lack of experimental and analytical study results. In this paper, the existing design equations for the Perfobond were briefly discussed and the equation for the prediction of shear resisting capacity of the reversed L-shaped and FRP perforated shear connector was suggested based on the experimental test, FEM analysis, and the existing equation for the Perfobond. The predict results obtained by the suggested equation are compared with the experimental results, the applicability and effectiveness of suggested equation was verified.

초 록

강합성교량에서 스티드 전단연결재 및 Perfobond 전단연결재와 관련된 문제를 해결하고, 콘크리트와 전단연결재가 동시에 파괴되도록 유도하기 위해 역 L형 유공판 전단연결재가 개발되었으며, FRP-콘크리트 합성바닥판에서는 FRP의 재료적 특성과 펄트루전 생산방식을 고려하여 콘크리트와 FRP의 합성방안으로 Perfobond 형 FRP 전단연결재를 적용하고 있다. 이 연구는 기존 강재 Perfobond 전단연결재에 대한 문헌분석, 2면전단실험, 유한요소해석 등의 방법을 통해 역 L형 유공판 전단연결재, FRP 전단연결재에 대한 각각의 강도를 추정할 수 있는 강도평가식을 제안하였고, 제안한 평가식의 결과와 실험결과를 비교하여 타당성을 검증하였다.

Key Words : 전단연결재(Shear Connector), 퍼포본드(Perfobond), 전단저항성능(Shear Resisting Capacity), 2면전단실험(Push-out Test), 역 L형 유공판 전단연결재(Reversed L-shaped Perforated Shear Connector), FRP 전단연결재(FRP Perforated Shear Connector)

1. 서 론

전단연결재는 강합성교량의 강재거더와 콘크리트 바닥판 사이의 접촉면에서 발생할 수 있는 슬립을 억제하여 강재거더와 콘크리트의 일체거동 및 효과적인 응력전달을 통해 합성구

조를 성립시키는 중요한 역할을 하며, 적용구조물의 특성을 고려하여 충분한 강성 및 강도를 확보함과 동시에 경제적인 시공이 가능하도록 결정되어야 한다. 특히, 기존건설재료의 단점을 보완하고 장수명 교량의 현실화를 위해 개발된 FRP-콘크리트 합성바닥판의 경우 FRP의 낮은 강성으로 휨에 대한

* 세진특허법률사무소, 교신저자(steelkyh@dreamwiz.com)

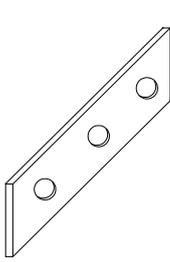


Fig. 1 Perfobond.

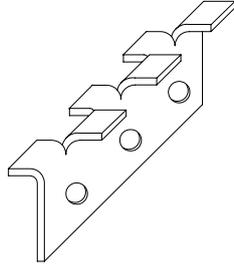


Fig. 2 Reversed L-shaped.

변형이 비교적 크게 발생하여 두 재료의 합성거동을 위한 기계적 장치의 고안은 매우 필수적인 사안으로 지적되고 있다.

콘크리트와 강재의 일체거동을 위한 전단연결재는 다양한 형태로 개발되어 적용되고 있지만 가장 일반적인 형태는 20세기 초에 개발된 스티드 전단연결재(Headed Studs)이다. 그러나 스티드 전단연결재를 사용한 경우 바닥판 콘크리트의 타설 후 콘크리트가 완전히 경화되기 전에 소량의 상대변위가 발생되며, 이 상대변위는 사용하중하에서 콘크리트 바닥판에 균열을 발생시키는 원인이 될 수 있고, 피로파괴를 유발할 수도 있는 것으로 연구, 보고된 바 있다⁽¹⁾. 따라서 스티드 전단연결재의 성능을 개선하여 보다 우수한 구조적 성능 및 연결부의 강성을 확보하며, 시공성, 경제성을 향상시킬 수 있는 새로운 형상의 전단연결재에 대한 많은 연구가 진행되고 있다⁽²⁾. 또한, FRP 교량의 경우 강재와 같은 접합방법으로는 구조적 신뢰성을 확보할 수 없기 때문에 FRP 제조시 합성거동을 유도할 수 있는 적절한 방법이 고안되어야 할 것이다.

Perfobond 전단연결재는 베네수엘라의 Third Caroni Bridge에서 Leonhardt가 기존 스티드의 문제점을 개선하고자 Perforated Rib Connector라는 강판에 구멍을 형성하여 개발하였다. 이 Perfobond 전단연결재는 강판에 구멍을 배치하여 바닥판 콘크리트로 형성되는 다우웰효과(Dowel Effect)로 수평전단력뿐만 아니라 수직력에도 저항하는 특성을 나타낸다⁽²⁾.

그러나 정 등의 연구^{(3),(4)}에 따르면 Perfobond 전단연결재는 콘크리트에 비해 강도가 상대적으로 크기 때문에 콘크리트 바닥판의 파괴를 발생시키는 단점이 있는 것으로 나타났으며, 이를 보완하기 위해 새로운 형태의 역 L형 유공판 전단연결재를 고안하여 거동특성에 대한 연구를 수행하였다.

역 L형 유공판 전단연결재는 사용하중하에서 초기에 큰 강성을 나타내고 극한강도에 도달한 이후에는 상당한 수준의 하중을 부담하는 연성거동의 특성을 나타내어 강재거더와 콘크리트 바닥판이 완전합성에 가까운 거동을 가지므로, 이상적인 전단연결재의 특성을 보유하고 있는 것으로 평가되고 있다⁽⁵⁾. 그러나 역 L형 유공판 전단연결재의 우수한 특성에도 불구하고 전단강도에 대한 평가식이 명확히 확립되어 있지 않아 그 적용성은 한계를 나타내고 있다. 따라서 이 연구에서는 역 L형 유공판 전단연결재와 형상이 유사한 Perfobond 전단연결재의 기존 연구

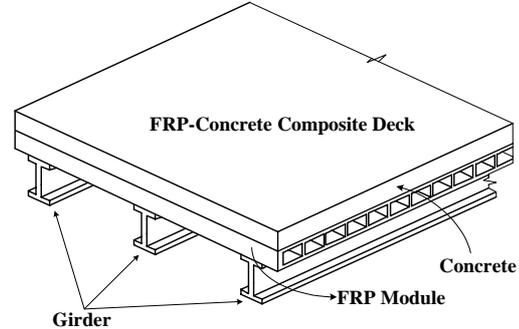


Fig. 3 FRP-Concrete Composite Deck.

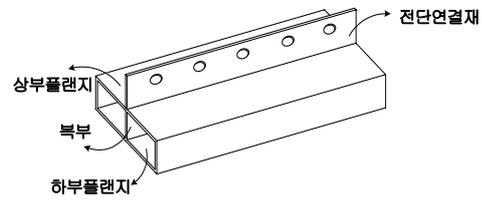


Fig. 4 FRP Module with Shear Connector.

결과를 조사하고, 정 등에 의해 수행된 실험결과^{(3),(4)}를 분석하며, 유한요소해석 등을 수행하여 역 L형 유공판 전단연결재에 대한 강도평가식을 제안하였다.

또한, 최근 장수명 교량개발을 위해 연구되고 있는 FRP-콘크리트 합성바닥판의 경우 다양한 방법으로 콘크리트와 합성하기 위한 연결재가 제안되어 연구되고 있지만 FRP 모듈에 전단연결재를 부착하는 방법은 효과적이지 못한 것으로 평가되고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 최근 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 Perfobond 전단연결재와 형태가 유사하게 전단연결재를 FRP 모듈과 일체로 제작하여 적용하는 방법을 채택하고 있다⁽⁶⁾.

Fig. 4에 나타낸 전단연결방안에서 FRP 전단연결재의 설계는 전단저항성능에 의해 결정되므로 전단연결재의 강도예측이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 Perfobond 전단연결재의 거동특성을 조사, 분석하여 얻은 결과와 2면전단 실험을 수행하여 FRP 전단연결방안에 대한 구조적 거동을 조사하고, 강도평가식을 제안하였다.

2. Perfobond 전단연결재의 강도평가

역 L형 유공판 전단연결재와 FRP 전단연결방안의 형상과 유사한 Perfobond 전단연결재의 전단저항성능은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 콘크리트 지압저항, 홀에 의한 다우웰효과, 홀을 관통하는 철근의 전단저항 등에 의해 결정되는 것으로 연구 보고된 바 있으며, 이러한 전단저항인자들을 각각 분류하고 실험을 통한 계수들을 적용하여 전단연결재의 강도를 평가하고 있다^{(7),(8)}.

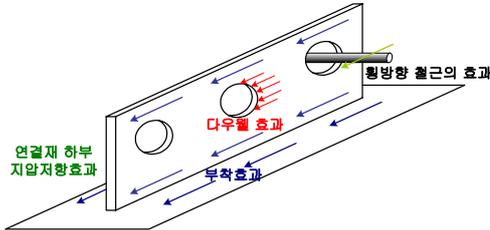


Fig. 5 Resistance Factor of Perforated Rib Shear Connector.

Hosain(1994)은 I형 거더에 Perforated Rib 전단연결재를 부착하고 콘크리트를 타설한 실험체에 대한 2면전단실험(Push-out Test)을 수행하여 Perforated Rib 전단연결재에 대한 강도평가식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$Q = 0.59A_{cc}\sqrt{f'_c} + 1.233A_vf_y + 2.871nd^2\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

식 (1)에서 Q 는 Perforated Rib 전단연결재의 강도(N), A_{cc} 는 전단연결재 1개당 콘크리트의 단면적(mm^2), f'_c 는 콘크리트 압축강도(MPa), A_v 는 홀에 배근된 철근 및 전단연결재 하단에 배근된 철근 단면적의 합, f_y 는 철근의 항복강도, n 은 Perforated Rib에 형성된 홀의 수, d 는 홀의 지름(mm)이다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 콘크리트 쪼개짐 저항효과, 두 번째 항은 횡방향 철근의 효과, 그리고 세 번째 항은 홀에 형성된 콘크리트의 다우웰효과로서 각 항들은 모두 실험결과를 통한 회귀 분석에 의해 결정된 것이다. 이후 Hosain(1997)은 식 (1)의 첫 번째 항을 Perforated Rib 전단연결재가 부착된 길이방향 콘크리트의 쪼개짐에 대한 저항에서 Perforated Rib의 높이와 두께를 고려한 하부콘크리트의 지압저항효과로 재평가하여 강도평가식을 식 (2)와 같이 수정, 보고하였다.

$$Q = 4.50h_p t_p f_c + 0.91A_v f_y + 3.31nd^2 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

식 (2)에서 h_p , t_p 는 각각 전단연결재의 높이(mm)와 두께(mm)이고, 두 번째항과 세 번째 항은 식 (1)에서 설명한 바와 같이 철근의 전단저항효과와 다우웰효과이다.

그러나 Medberry 등(2002)은 다양한 변수를 통한 Perforated Rib 전단연결재에 대한 실험적 연구를 통해 식 (2)에 추가적으로 부착효과를 도입하였으며, 콘크리트에 의한 지압효과를 콘크리트에 발생하는 인장응력분포를 통해 결정하여 Perforated Rib 전단연결재의 강도평가식을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$Q = 0.75bh\sqrt{f'_c} + 0.41b_f L_c + 0.9A_v F_y + 1.304nd^2\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

식 (3)에서 첫 번째 항은 콘크리트 바닥판의 쪼개짐 저항효과로서 2면전단(Push-out) 실험체의 선형유한요소해석을 통해 연결재 하부 콘크리트블럭에 발생하는 인장응력분포형태를 이

상화된 응력블럭으로 치환한 후 응력블럭의 각 치수를 실험결과 및 유한요소해석 결과로부터 결정하였다.

두 번째 항은 Hosain이 제안한 식에서는 고려되지 않은 콘크리트와 Perforated Rib 전단연결재 사이의 부착효과이다. Medberry 등은 그의 2면전단 실험결과로부터 콘크리트와 강재 사이의 화학적 부착에 의한 평균저항성능을 $60psi$ ($0.41MPa$)으로 규명하고, 부착면적을 곱하여 부착에 의한 저항강도를 결정하였다.

세 번째 항은 Perforated Rib 전단연결재의 홀에 횡방향으로 설치된 철근의 전단저항효과로서 마찰계수 μ 는 1.0으로 가정하고, 실험결과로부터 철근에 발생하는 전단응력을 $0.9f_y$ 로 규정하여 철근에 의한 전단저항강도를 철근의 응력과 단면적(A_v)을 곱하여 결정하였다.

네 번째 항은 Perforated Rib 홀에 의해 형성된 콘크리트의 다우웰효과로서 구조적 거동을 볼트의 2면 전단과 같이 가정하여 평균전단응력을 실험에 의해 $20\sqrt{f'_c}$ (psi)으로 규정하여 식을 구성하였다.

3. 역 L형 유공판 전단연결재의 강도평가

3.1 실험적 연구

이 연구에서는 역 L형 전단연결재의 강도평가식에 대한 검증 등을 위해 정 등(2004, 2005)^(3,4)에 의해 수행된 연구결과를 인용하였으며, 정 등에 의해 수행된 연구내용 및 연구결과를 간략히 정리하면 다음과 같다.

역 L형 유공판 전단연결재의 거동을 조사하기 위한 실험은 하중전달구조가 단순하고 제작이 간편하며 기존에 보편적으로 사용되고 있는 2면전단 실험에 의해 수행되었다. 실험체는 역 L형 유공판 전단연결재를 I형강과 원형강관에 부착하고 콘크리트를 타설하여 제작하였으며, 실험변수는 홀의 수, 전단연결재의 높이, 홀의 직경, 철근의 수 등이다. 각 실험체의 변수 및 치수는 Table 1에 정리하였으며, 실험체의 치수 및 형상 등은 Fig. 6, 7에 각각 나타내었다.

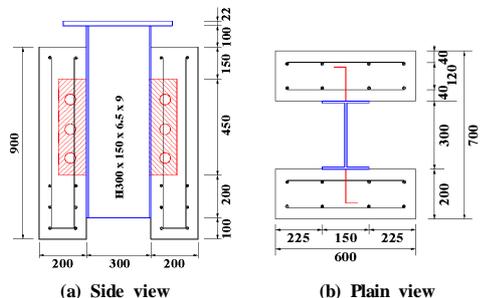


Fig. 6 Push-out test specimen with I-shaped steel girder.

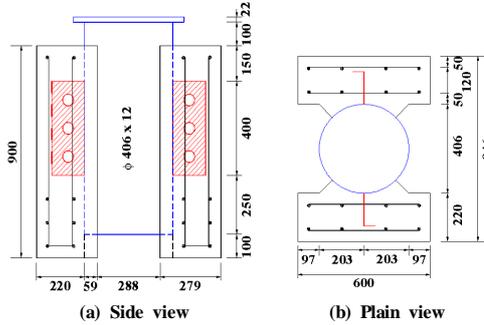


Fig. 7 Push-out test specimen with circular-shaped steel girder.

Table 1 Characteristics of push-out test specimen and test results^{(3), (4)}

No.	강재	f'_c (MPa)	h_p (mm)	b_p (mm)	t_p (mm)	n	n_s	d (mm)	Q_u (kN)
1	I형	27.5	130	50	8	3	0	40	566
2		27.5	130	50	8	3	1	40	594
3		27.5	130	50	8	3	2	40	646
4		27.5	130	50	8	3	3	40	682
5		27.5	70	50	8	3	0	40	528
6		27.5	70	50	8	3	3	40	615
7	원형	27.5	150	50	8	3	0	50	732
8		27.5	150	50	8	3	1	50	764
9		27.5	150	50	8	3	2	50	853
10		27.5	150	50	8	3	3	50	888
11		35.7	150	50	8	3	3	50	914
12		40.8	150	50	8	3	3	50	941
13		27.5	150	50	8	2	0	50	680
14		27.5	150	50	8	4	0	50	727
15		27.5	150	50	8	3	3	40	813
16		27.5	150	50	8	3	3	60	755
17		27.5	130	50	8	3	3	50	810
18		27.5	170	50	8	3	3	50	896
19		27.5	150	25	8	3	3	50	826
20		27.5	150	50	8	3	3	50	881

f'_c : 콘크리트 압축강도
 h_p : 전단연결재 높이
 b_p : 전단연결재 머리부분의 폭
 t_p : 전단연결재 두께
 n : 홈의 개수
 n_s : 홈에 삽입된 철근의 개수
 d : 홈의 지름
 Q_u : 파괴강도

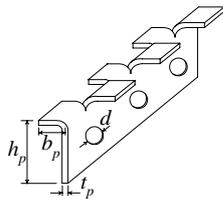


Table 1에 나타난 전단연결재의 강도(Q_u)는 실험결과로부터 측정된 최대강도를 나타내며, 실험결과 실험체는 최대강도 도달 이후 바로 파괴되지 않고 상당한 연성거동을 나타낸 후 파괴되는 것으로 분석되었다.

3.2 유한요소해석

이 연구에서는 Medberry 등이 Perfobond 전단연결재의 강도평가에서 제안한 방법과 유사하게 역 L형 유공판 전단연결재의 강도를 평가하기 위해 GTSTRUDL을 사용하여 해석하였다. 유한요소모델링에서 콘크리트블럭에 사용한 유한요소는 3차원 유한요소인 TRIP(Triangular Prism)요소이고, I형 강재는 IPLS(Isoparametric Linear Solid)요소이다. 역 L형 유공판 전단연결재 실험체의 유한요소해석모델은 Fig. 8에 나타내었다.

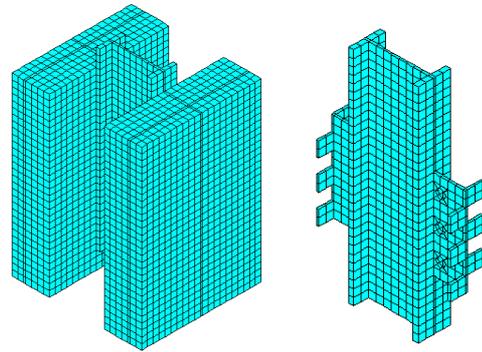


Fig. 8 Discretization of specimen into finite elements.

유한요소해석에서 하중은 정 등의 실험에서와 유사하게 콘크리트블럭과 연결된 I형강 상부에 등분포하중을 재하하였고, 경계조건은 하부 콘크리트블럭의 내부 중앙을 고정지기로 하고 나머지 절점에 대해서는 변위를 허용하도록 하였으며, 정적탄성해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료의 역학적 성질은 Table 2에 나타내었다.

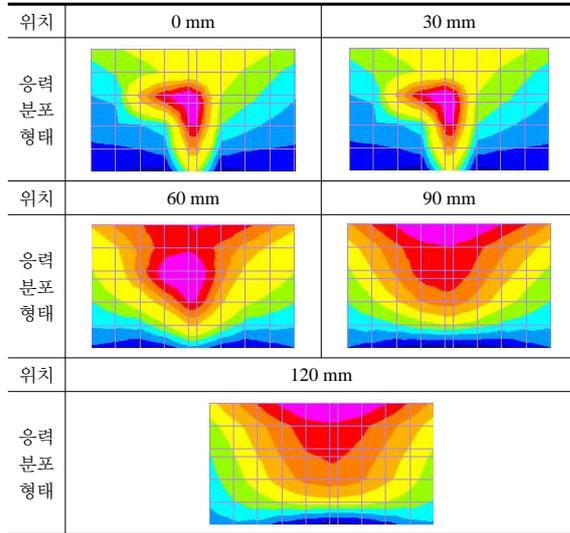
Table 2 Mechanical properties used in FEM analysis

재료	탄성계수(MPa)	포아송비
콘크리트	25,000	0.17
I형강	200,000	0.3
전단연결재	200,000	0.3

이 연구의 유한요소해석은 Medberry 등에 의해 제안된 강도평가식과 유사하게 전단연결재 하부에 발생하는 응력분포를 조사하기 위해 수행하였기 때문에 강재와 콘크리트 경계면의 부착효과와 횡방향 철근의 효과는 고려하지 않았다.

유한요소해석결과 역 L형 유공판 전단연결재 하부에서 발생하는 콘크리트의 축방향 응력분포를 연결재 하단으로부터 거리에 따라 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 알 수 있듯이 응력분포는 역 L형 전단연결재의 단면모양과 유사한 형태로 나타나지만 전단연결재의 하단에서 멀어질수록 삼각형 형태와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 3 Stress contour underneath the shear connector



3.3 강도평가

Perfobond 전단연결재와 역 L형 유공판 전단연결재의 차이 점은 머리부분의 단면형상이다. 따라서 전단저항거동은 머리 부분에 대한 저항효과를 고려하면 Perfobond 전단연결재와 유사할 것으로 생각된다.

Medberry 등이 제안한 강도평가식 (3)에서 유공판 전단연결재의 전단저항효과에 대해 4가지 요소(조개짐저항, 부착효과, 철근의 전단효과, 콘크리트의 다우웰 효과)를 두고 평가하고 있으나 이 식을 역 L형 유공판 전단연결재에 적용할 경우 머리부분에 의한 저항효과가 고려되지 않기 때문에 상당히 낮은 강도를 예측할 것이다. 이 연구에서는 유공판 전단연결재의 머리부분의 저항효과를 식 (3)의 첫 번째 항인 콘크리트 지압저항효과에 반영하도록 하였다.

2면 전단실험(push-out test)에 의한 식 (3)에서 조개짐 저항평가 항은 유공판 연결재에 의해 하부면 콘크리트가 지압응력이 상승함에 따라 조개짐 균열이 발생하는 현상을 유한요소해석 평가를 통해 이를 제시한 항이다. 그러나 Hosain(1997)이나 국내 정(2004)^(3,4)과 이(2003)⁽⁵⁾에서 perfobond나 역L형 전단연결재는 단부에 두께를 고려한 콘크리트 지압강도로 인하여 전단내력이 상승한다고 평가하고 있다. 그리고 Medberry 등은 콘크리트 지압저항 효과에 Perfobond 전단연결재의 단면형상만을 고려하여 지압면적을 전단연결재의 단면적으로 제한하여 평가하고 있다.

따라서 본 연구의 유한요소해석 결과, 역 L형 유공판 전단연결재의 하부에 발생하는 압축응력분포가 머리부분의 효과로 인해 삼각형 형태로 발생하여 지압저항효과는 기존 연구 Perfobond 전단연결재에 비해 비교적 크게 나타났다. 따라서

이 연구에서는 역 L형 유공판 전단연결재의 지압저항효과를 삼각형 형태로 가정하여 강도평가식을 제안한다.

역 L형 유공판 전단연결재 하부의 지압저항효과는 콘크리트구조설계기준(2007)⁽⁹⁾을 적용하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4)는 실험에 근거를 두고 있지만 콘크리트 하중재하 면적보다 지지면적이 클 경우 주위의 콘크리트가 지압면을 횡구속하여 지압강도가 증가하는 것을 반영하고 있어 콘크리트 내부에 설치되는 전단연결재의 하부지압강도로 표현하는데 어느 정도 신뢰성을 확보한 것으로 판단할 수 있다.

$$Q_b = \phi \left(0.85f'_c \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \right) A_1 \tag{4}$$

식 (4)에서 ϕ 는 강도감소계수, A_1 은 하중재하면적(mm^2), A_2 는 재하면적과 같은 닳은꼴이고 중심이 같은 지지표면 일부분의 최대면적이다. 여기서, A_2 는 하중재하면의 주위 콘크리트가 지압면을 횡구속하는 영향을 고려한 변수로서 콘크리트구조설계기준에서는 $\sqrt{A_2/A_1}$ 의 최대값을 2로 제한하고 있다. 이 연구에서는 전단연결재가 콘크리트 내부에 설치되어 주위 콘크리트에 의한 지압면의 횡구속효과가 비교적 큰 것으로 가정하고 최대값을 적용하였다. 또한, ϕ 는 콘크리트구조설계기준에 따라 0.85를 적용하였으며, 하중재하면적 A_1 은 유한요소해석에서 역 L형 전단연결재 하부에서 발생하는 삼각형 응력분포형태와 전단연결재 단면치수를 고려하여 식 (5)와 같이 가정하였다.

$$A_1 = \frac{1}{2}(2b_p h_p) \tag{5}$$

식 (5)에서 b_p 는 역 L형 유공판 전단연결재 머리부분의 폭으로 $2b_p$ 는 삼각형의 한 변의 길이를 나타내며, h_p 는 전단연결재의 높이이다. 따라서, 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 역 L형 전단연결재의 지압저항효과로 나타내고 Medberry가 제안한 식 (3)에서 첫 번째 항을 역 L형 유공판 전단연결재의 머리부분의 효과를 고려한 지압저항효과로 표현하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = 1.70h_p b_p f'_c + 0.9A_v f_y + 1.304nd^2 \sqrt{f'_c} + 0.41b_j L_c \tag{6}$$

이 연구에서 제안한 식 (6)에 대한 타당성을 검증하기 위해 정 등에 의해 수행된 실험결과와 Hosain, Medberry 등에 의해 제안된 강도평가식에 정 등의 실험체 제원을 대입하여 얻은 결과를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 Q_{exp} 는 실험에 의해 얻은 역 L형 전단연결재의 최대강도이고, Q_{pre} 는 각 연구자 및 이 연구에서 제안한 강도평가식에 의한 결과이다.

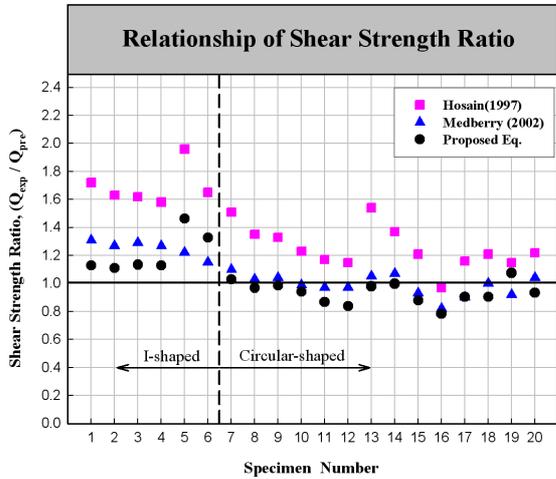


Fig. 9 Comparison of proposed equations.

Hosain과 Medberry가 제안한 강도평가식을 적용하여 예측한 역 L형 유공판 전단연결재의 전단강도는 일부 실험체에서 정 등의 실험결과와 비교할 때 비교적 정확한 값을 예측하고 있으나 대부분의 실험체에서 실험에 의한 결과값 보다 비교적 작은 값을 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 기존 Perfobond 전단연결재의 강도평가식이 역 L형 유공판 전단연결재 머리부분 효과를 반영하지 못한 결과인 것으로 판단되며, 머리부분의 효과를 콘크리트 지압효과에 반영한 이 연구의 강도평가식이 비교적 정확한 전단강도를 평가하는 것으로 나타나고 있다.

4. FRP 전단연결재의 강도평가

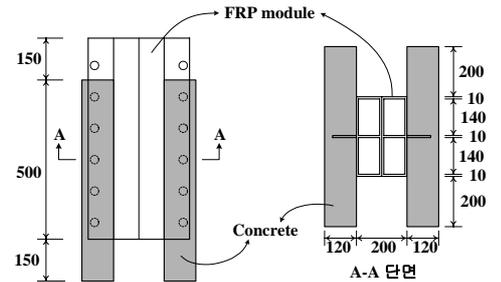
FRP-콘크리트 합성바닥판은 교량 상부하중을 거더에 전달하는 역할을 하는 부재로서 경제적 이유로 펄트루전 GFRP 적용하고 있으며, 교축직각방향으로 강도와 강성이 매우 큰 일방향 바닥판이다. 강합성교에서 전단연결재는 강거더에 용접을 통해 연결되어 거더와 바닥판 사이의 합성거동을 위해 사용하지만 Fig. 3에 나타난 FRP-콘크리트 합성바닥판의 경우 전단연결재는 FRP와 콘크리트 사이의 합성거동을 위해 적용된다. 그러나 FRP의 경우 강재와 같은 접합방법을 사용할 수 없기 때문에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 전단연결재를 FRP 모듈과 일체로 제작하는 방법을 적용하고 있다. 전단연결재가 부착된 FRP 모듈(Fig. 4 참조)과 Perfobond 전단연결재의 형상은 유사하지만 구조거동에서는 매우 큰 차이가 있다. Perfobond 전단연결재의 경우 전단저항성능은 Fig. 5와 같이 4가지 요소에 의해 결정할 수 있는 것으로 평가되고 있으나 FRP 전단연결방안의 경우 펄트루전 방법에 의해 생산하기 때문에 전단연결재가 모듈과 함께 길이방향(교축직각방향)으로 연속화 되

어 있어 Perfobond 전단연결재의 단면에서 발생하는 지압저항 효과는 존재하지 않는다. 따라서 이 연구에서는 Perfobond 전단연결재의 전단저항요소 중 지압저항 효과를 제외한 나머지 효과에 대해 검토하여 전단성능 평가식을 제안하였다.

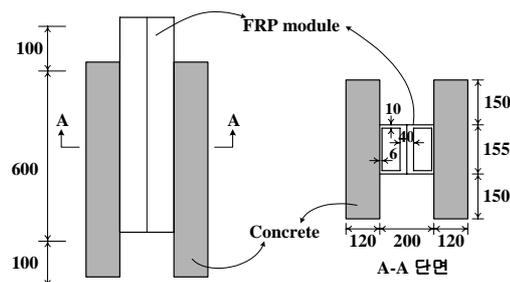
4.1 2면 전단실험(Push-out Test)

FRP 전단연결재 강도평가 실험체의 치수 및 형상은 Fig. 10에 나타내었다. 실험체 제작시 콘크리트를 타설하기전 FRP 표면은 부착성능을 증진시키기 위해 에폭시 도포후 모래를 살포하고 다시 에폭시를 도포하는 방식의 규사코팅을 하였다⁽⁶⁾. Fig. 10(a)에 나타낸 실험체는 FRP 전단연결재를 갖는 실험체이며, Fig. 10(b)에 나타낸 실험체는 규사코팅된 FRP 표면의 전단강도를 조사하기위해 전단연결재가 없는 FRP 모듈을 사용하였다.

각 실험체에서 FRP 모듈의 두께와 콘크리트 두께를 포함한 총 두께는 FRP-콘크리트 합성바닥판의 두께가 되며 이는 현재 도로교 설계기준에서 제안하고 있는 교량바닥판의 최소 단면치수를 고려하여 결정한 것이다.



(a) Test specimen with Shear Connector



(a) Test specimen without Shear Connector

Fig. 10 Dimension of Push-out Test Specimen (mm).

실험체 제작에 사용된 재료의 역학적 성질은 Table 4에 나타내었으며, 실험체 설치 및 하중재하는 Fig. 11에 나타내었다.

2면전단실험결과 FRP 전단연결재가 부착된 실험체에서 파괴거동은 두 실험체에서 유사하게 나타났고, 하중재하 초기단계

에서는 특별한 거동은 조사되지 않았으나 하중이 증가하면서 FRP 모듈과 콘크리트 블록사이의 계면이 분리되면서 갑작스럽게 파괴되었으며, 계면이 파괴되는 충격으로 전단연결재와 FRP 모듈의 상부플랜지 접합면에서 균열이 발생하였다. 이러한 현상으로부터 FRP 모듈과 콘크리트 사이의 전단응력은 주로 규사코팅된 면이 부담하게 되며, 전단연결재는 추가적인 역할을 하고 있는 것으로 생각된다.



Fig. 11 Push-out Test.

Table 4 Material properties

역학적 성질	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
FRP 모듈	전단연결재	427.0
	상부플랜지	401.0
	복부	386.0
	하부플랜지	439.0
FRP re-bar ($\phi 9mm$)	738.4	28.8
역학적 성질	압축강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
콘크리트	45.0	29.8

Table 5 Test Result

Spec.	No. 1	No. 2	No. 3
파괴하중 P_{max} (kN)	1,846	1,737	341.57
변위 (mm)	LVDT #1	1.610	1.360
	LVDT #2	1.895	0.715

전단연결재가 없는 실험체는 전단연결재가 있는 실험체에 비해 콘크리트와 FRP사이의 부착면이 상대적으로 작고, 규사코팅 부착면 외에 전단에 저항하는 요소가 없기 때문에 비교적 낮은 하중단계에서 계면분리 파괴형태를 나타내었다.

2면전단실험결과 계측기로부터 측정한 파괴하중과 변위를 Table 5에 정리하였다. Table 5에서 파괴하중은 FRP 모듈과 콘크리트 블록의 계면이 파괴되는 최대하중 값이고, 변위는 실험체가 파괴될 때 FRP모듈과 콘크리트 블록의 상대변위를

나타낸다.

Table 6 Comparison of Result

	Q_{frp} (kN)	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_{frp}
No. 1	917	923	1.00
No. 2		869	0.95

4.2 실험결과 분석 및 강도평가

FRP-콘크리트 합성바닥판에서 FRP 전단연결재는 이미 설명한 바와 같이 불연속면이 존재하지 않기 때문에 콘크리트 지압저항효과는 기대할 수 없다. 따라서 FRP 전단연결재의 강도평가를 위해 Fig. 5에 나타낸 저항요소에서 지압효과를 제외한 세가지 변수, 즉 FRP 모듈과 콘크리트 부착면의 저항, 전단연결재 구멍에 형성된 콘크리트의 다우웰효과, 횡방향으로 배근된 FRP Re-bar의 전단강도를 고려하여야 할 것이다. 그러나 실험결과를 분석하면 콘크리트와 FRP Re-bar의 탄성계수가 유사하고, 파괴될 때 콘크리트 블럭과 FRP 모듈사이의 상대변위가 매우 작기 때문에 철근을 배근한 강재 Perfobond 전단연결재와는 달리 FRP Re-bar에 의한 전단저항 요소는 무시할 만큼 작으며, FRP 모듈역시 콘크리트와 탄성계수가 유사하고 상대변위가 작기 때문에 홀에 의한 다우웰효과가 전단저항에 미치는 영향은 부차전단강도에 비해 매우 작은 것으로 분석되었다. 따라서 형태가 유사한 강재 Perfobond 전단연결재의 강도평가식에서 부차전단강도를 제외한 나머지 항을 제외하면 FRP 전단연결재의 강도평가식은 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{frp} = f_b A_b \tag{8}$$

식 (8)에 의한 결과와 실험결과를 비교하여 전단연결재 1개에 대한 값으로 환산하면 전단연결재의 강도는 Table 6과 같다. 실험결과와 식 (8)에 의한 결과를 비교할 때 매우 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 FRP-콘크리트 바닥판에서 적용한 전단연결재는 전단연결재의 치수와 부착면의 전단응력을 변수로 설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한, FRP Re-bar는 전단저항에 끼치는 영향은 작지만 콘크리트 건조수축을 억제하기 위해서는 적절히 배근되어야 할 것이다.

5. 결론

이 연구는 Perfobond 전단연결재의 구조적 거동을 분석하고, 유사한 형태의 역 L형 유공판 전단연결재와 FRP 전단연결재에 대한 실험결과를 분석하여 강도평가식을 제안하였다. 이 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Perfobond 전단연결재는 기존 스티드 전단연결재에 비해 구조적 성능이 우수한 것으로 평가되고 있으나 콘크리트에 비해 강성이 크기때문에 콘크리트 바닥판의 파괴를 발생시키며 역 L형 유공판 전단연결재는 이러한 문제점을 완화 시킬 수 있다.
- (2) Perfobond 전단연결재에 대해 개발된 강도평가식을 역 L형 유공판 전단연결재의 강도평가에 적용할 경우 머리부분의 효과를 적절히 반영할 수 없다.
- (3) 역 L형 유공판 전단연결재 하부의 콘크리트에 발생하는 응력분포는 머리부분의 지압효과에 의해 삼각형 형태로 발생한다.
- (4) 역 L형 유공판 전단연결재의 강도평가식을 Perfobond 전단연결재의 강도평가식에 머리부분의 지압저항효과를 반영하여 수정, 제안하였으며, 정 등에 의한 실험결과와 유사함을 확인하였다.
- (5) Perfobond 전단연결재와 형태가 유사한 FRP 전단연결재의 경우 Perfobond 전단연결재의 거동과는 달리 FRP와 콘크리트의 강성이 유사하고, FRP와 콘크리트 블럭 사이의 상대변위가 미소하여 흠에 의한 다우웰 효과, 흠에 관통되는 FRP Re-bar에 의한 전단저항효과는 무시할 만큼 작은 것으로 나타났다.
- (6) FRP 전단연결재의 전단강도는 실험결과를 분석한 결과 유사코팅된면의 부착전단에 의해 결정되며 설계는 전단연결재의 치수에 의해 결정될 수 있다.
- 8) Medberry, S. B. and Shahrooz, B. M., "Perfobond Shear Connector for Composite Construction," *AISC Engineering Journal*, First Quarter, 2002, pp. 2-12.
- 9) 한국콘크리트학회, 콘크리트구조설계기준, 2007.
- 10) 김선우, 남정훈, 박상권, 윤순종, 정재호, "Perfobond FRP 전단연결재의 강도평가에 관한 실험적 연구," 한국복합재료학회 춘계학술발표대회 논문집, 2006, pp. 163-168.
- 11) 최지영, 송근일, 권진희, 최진호, 김광수, 장영순, "복합재-하니콤 샌드위치 구조물의 인서트 조인트 강도 특성 연구," 한국복합재료학회 논문집, Vol. 20, No. 5, 2007.

참고문헌

- 1) 박정환, "역 L형 유공판 전단연결재의 강도평가에 관한 연구," 석사학위논문, 홍익대학교, 2006.
- 2) 조영록, 유성근, 정남진, "다우웰 바를 활용한 Perfobond 전단연결재에 관한 성능 고찰," 대한토목학회지, 제55권, 제5호, 2007, pp. 48-56.
- 3) 정철현, 이홍수, 박종면, 김영호, "합성작용을 위한 새로운 Perfobond 전단연결재," 대한토목학회논문집, 제24권, 제 3-A호, 2004, pp. 525-532.
- 4) 정철현, 유성근, 최외호, "원형강관 거더와 콘크리트 바닥판 사이 Γ 형 Perfobond 리브 전단연결재의 실험적 연구," 대한토목학회논문집, 제25권, 제1-A호, 2005, pp. 201-212.
- 5) 이홍수, " Γ 형 Perfobond 리브 전단연결재의 전단거동," 박사학위논문, 단국대학교, 2003.
- 6) 한국건설기술연구원, "장수명합리화바닥판개발(무강재 바닥판, 4차년도)," 연구보고서, 2005.
- 7) Oguejiofor, E. C. and Hosain, M. U., "Numerical Analysis of Push-out Specimens with Perfobond Rib Connectors," *Computer & Structures*, Vol. 62, No. 4, 1997, pp. 617-624.